

## ВЛИЯНИЕ СУЛЬФАТ-ИОНОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИОНООБМЕННОЙ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ НИТРАТОВ

С. В. Андreyuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь; e-mail: a\_asv75@mail.ru

### Реферат

В статье содержатся результаты экспериментальных исследований по изучению влияния анионного состава подземных вод на эффект удаления нитратов методом ионного обмена. Задачей экспериментальных исследований являлось получение зависимостей остаточной концентрации нитратов от анионного состава исходной воды (содержания хлоридов, гидрокарбонатов, сульфатов) с построением треугольных диаграмм и использованием метода оптимального планирования многофакторного эксперимента.

Полученная экспериментально-статистическая модель процесса ионообменной очистки воды от нитратов позволяет количественно определить значения остаточной концентрации нитратов при любом исходном содержании сопутствующих анионов подземных вод. Наибольшую конкуренцию по отношению к нитрат-ионам в ионообменном процессе составляют сульфат-ионы.

**Ключевые слова:** нитраты, ионный обмен, питьевая вода, подземные воды, математическая модель.

## THE IMPACT OF SULFATE IONS ON THE EFFECTIVENESS OF GROUNDWATER PURIFICATION FROM NITRATES BY ION EXCHANGE

S. V. Andreyuk

### Abstract

The article contains the results of experimental studies on the effect of the anionic composition of groundwater on the effect of nitrate removal by ion exchange. The aim of the experimental studies was to obtain the dependences of the concentration of residual nitrate on the anionic composition of the source water (the content of chlorides, bicarbonates, sulfates) with the construction of triangular diagrams and the use of the optimal complete factorial experiment.

The obtained experimental-statistical model of the process of ion-exchange water purification from nitrates allows to quantitatively determine the values of the residual concentration of nitrates at any initial content of groundwater anions. The greatest competition with respect to nitrate ions in the ion-exchange process is sulfate ions.

**Keywords:** nitrates, ion exchange, drinking water, groundwater, mathematical model.

### Введение

Анионный состав исходной воды является одним из основных факторов, оказывающих влияние на эффективность ионообменной очистки. Наряду с зависимостью от исходной концентрации нитратов в воде, особенностью организации метода ионного обмена для удаления из подземных вод нитратов является изменение состава исходной воды по ионным компонентам: сульфатам, хлоридам, гидрокарбонатам [1].

Целью выполненных экспериментальных исследований стало изучение влияния анионного состава подземных вод и концентрации удаляемых ионов на эффект удаления нитратов методом ионного обмена с использованием метода оптимального планирования многофакторного эксперимента.

Многофакторный эксперимент широко используется в современной научной деятельности и является эффективным средством обработки и планирования экспериментальных исследований [2]. Планированием многофакторного эксперимента называется процедура выбора числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Математические модели, полученные с помощью методов планирования экспериментов принято называть экспериментально-статистическими [2, 3]. При использовании статистических методов планирования эксперимента математическое описание представляется в виде полинома:  $Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ , где  $Y$  – функция отклика (величина, качественно характеризующая протекание процесса), а  $X_1, X_2, X_3$  – влияющие факторы (аргументы) исследуемо-

го процесса. При этом ценность математического описания заключается в том, что оно дает информацию: о закономерностях влияния отдельных факторов на функцию отклика; позволяет количественно определить значение функции отклика при заданных значениях факторов; может служить основой для оптимизации процесса [4].

### Исследование влияния анионного состава воды на эффект удаления нитратов

Для получения зависимостей остаточной концентрации нитратов от анионного состава исходной воды (содержания хлоридов, гидрокарбонатов, сульфатов) был применен метод треугольных диаграмм с построением графика Ферре [5]. Исследования процесса очистки воды от нитратов методом ионного обмена проводились на кафедре водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Учреждения образования «Брестский государственный технический университет» и были выполнены на экспериментальной установке, представляющей собой модель ионообменного фильтра – фильтрационную колонку, загруженную ионообменной смолой (рисунок 1) при следующих условиях ведения процесса:

- марка анионита – «Purolite NRW-600(OH)»;
- скорость фильтрации –  $V = 14$  м/ч;
- величина отношения высоты загрузки колонки к ее диаметру –  $H/d = 5,6$ ;
- температура воды –  $t = 19^\circ\text{C}$ .

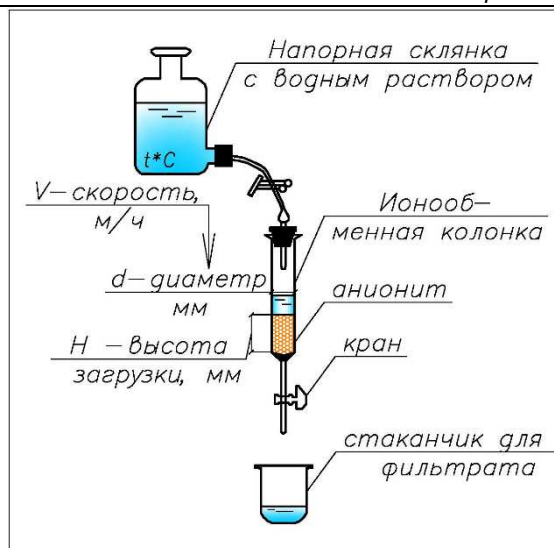


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

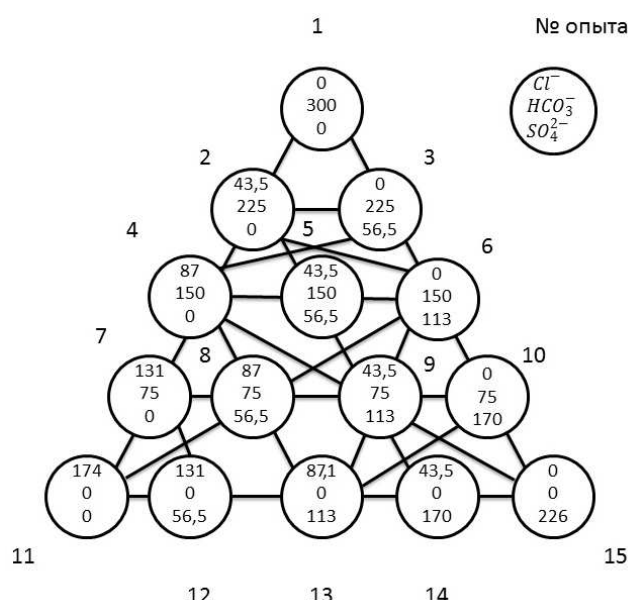


Рисунок 2 – Анионный состав исходных водных растворов

В качестве модельной воды использовали водопроводную воду с добавкой нитратов в количестве 50 мг/дм³, что соответствует концентрации, в 1,1 раза превышающей предельно допустимую (45 мг/дм³) [6].

Минеральный состав исходных растворов был ограничен содержанием анионов Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ и NO₃⁻ [7–10] в концентрациях: хлоридов Cl⁻ – до 174 мг/дм³, гидрокарбонатов HCO₃⁻ – до 300 мг/дм³, сульфатов SO₄²⁻ – до 226 мг/дм³, нитратов NO₃⁻ – до 45 мг/дм³ (общая минерализация составила – до 10 мг-экв/дм³), что представлено на рисунке 2.

Процесс нахождения математической модели включал в себя: планирование эксперимента, проведение эксперимента на объекте исследований; проверка воспроизводимости эксперимента (с помощью критерия Кохрена  $G=0,407$  при табличном значении 0,616); получение математической модели объекта с проверкой статистической значимости выборочных коэффициентов регрессии (с учетом значения критерия Стьюдента  $t=2,57$ ); проверка адекватности математического описания (по критерию Фишера при 5%-м уровне значимости  $F=4,86$  при табличном значении 5,05).

Результаты эксперимента были обработаны на ЭВМ, на основании чего составлено уравнение регрессии  $Y=f(X_1, X_2, X_3)$  в виде многочлена второй степени от трех переменных (в кодированных переменных):

$$Y = 0,32 + 0,97(X_1) + 1,14(X_2) + 1,54(X_3) + 0,53(X_1^2) + 0,66(X_2^2) + 0,78(X_3^2), \quad (1)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  – кодированные переменные, связанные с физическими ( $x_1, x_2, x_3$ ) следующими соотношениями:

$$X_1 = 0,006 \cdot x_1; X_2 = 0,004 \cdot x_2; X_3 = 0,006 \cdot x_3, \quad (2)$$

где  $X_1$  – концентрация хлоридов, мг/дм³;

$X_2$  – концентрация гидрокарбонатов, мг/дм³;

$X_3$  – концентрация сульфатов, мг/дм³.

При различном исходном содержании хлоридов и гидрокарбонатов изменение остаточной концентрации нитрат-ионов зафиксировано соответственно в пределах 7,7 и 8,36%, что представлено на рисунках 4, 5.

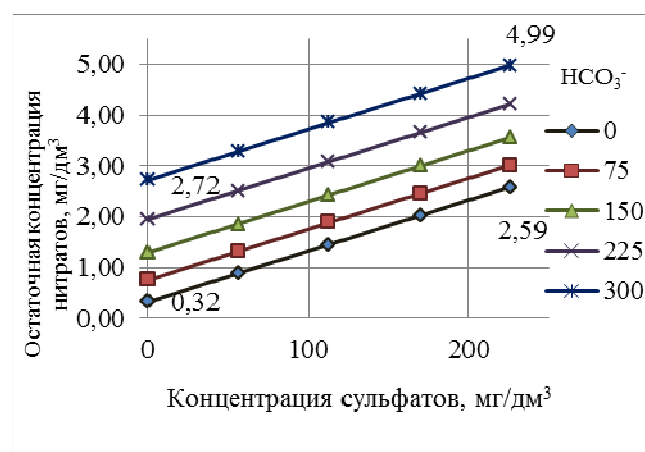


Рисунок 3 – Влияние концентрации сульфатов на процесс удаления нитратов

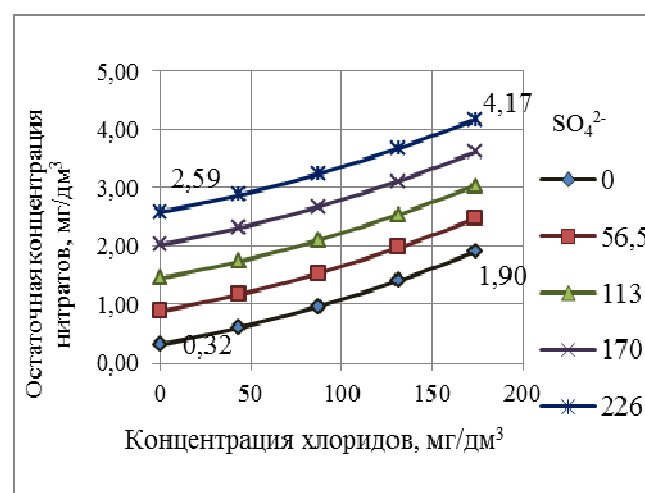


Рисунок 4 – Влияние концентрации хлоридов на процесс удаления нитратов при различной концентрации сульфатов

Полученное математическое описание, во-первых, дает информацию о влиянии факторов, во-вторых, позволяет количественно определить значения функции отклика (остаточной концентрации нитратов) при любом заданном режиме ведения процесса очистки воды.

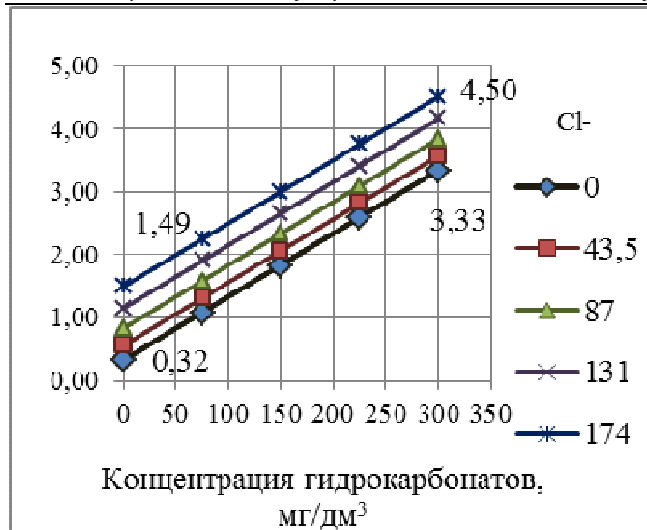


Рисунок 5 — Влияние концентрации гидрокарбонатов на процесс удаления нитратов при различной концентрации хлоридов

### Заключение

Согласно результатам экспериментальных исследований, наибольшую конкуренцию по отношению к нитрат-ионам в ионообменном процессе составляют сульфат-ионы, однако их концентрация на выходе не снижается до нуля; в процессе очистки с сульфат-ионами конкурируют гидрокарбонат-ионы.

Ионы подземных вод, поглощаемые анионитом, располагаются в порядке родства следующим образом:  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ .

В целом изменение анионного состава воды в процессе удаления нитратов ионным обменом не ухудшает её природных свойств и соответствует качеству и физиологической полноценности питьевой воды.

### Список цитированных источников

1. Андреюк, С. В. Исследование методов физико-химической очистки природных вод от нитратов / С. В. Андреюк // Сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Брест, 6–8 апреля 2016 г. : в 2-х ч. / УО «Брестский гос. тех. нический ун-т»; под ред. А. А. Волчек [и др.]. – Брест, 2016. – Ч. II. – С. 159–163.
2. Дегтярев, Д. А. Пошаговая методика проведения многофакторного эксперимента. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://manyfactors.ru>. – Дата доступа : 07.01.2019.
3. Мухачёв, В. А. Планирование и обработка результатов эксперимента : учеб.-метод. пособие / В. А. Мухачёв. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 118 с.
4. Житенев, Б. Н. Планирование многофакторного эксперимента на примере ионообменной очистки воды от нитратов / Б. Н. Житенев, С. В. Андреюк // Вестник БрГТУ. – 2019. – № 2 : Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 38–43.
5. Метод треугольных координат (график Ферре). [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lektsii.com/1-88954.html>. – Дата доступа : 19.01.2015.
6. Бегеза, А. А. Исследования влияния анионного состава воды на эффект удаления нитратов / А. А. Бегеза // Сборник конкурсных научных работ студентов и магистрантов: в 2 частях / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; редкол. : Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – Часть 1. – С. 4–6.

7. Вода питьевая. Методы определения минеральных азотсодержащих веществ: ГОСТ 4192-82. – Переизд. май 2011. – Взамен ГОСТ 4192-48; введ. РБ 17.12.92. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2011. – 5 с.
8. Вода питьевая. Методы определения содержания хлоридов: ГОСТ 4245-72. – Переизд. сентябрь 2011. – Взамен ГОСТ 4245-48; введ. РБ 17.12.92. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2011. – 5 с.
9. Вода питьевая. Методы определения содержания сульфатов: ГОСТ 4389-72. – Переизд. май 2011. – Взамен ГОСТ 4389-48; введ. РБ 17.12.92. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2011. – 6 с.
10. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов: ГОСТ 31957-2012; введ. РБ 01.01.2016. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2011. – 32 с.

### References

1. Andreyuk, S. V. Study of Methods of Physical and Chemical Purification of Natural Waters from Nitrate / S. V. Andreyuk // Collection of Scientific Articles of the International Scientific and Practical Conference, Brest, April 6-8, 2016: at 2 h. / Brest State Technical Office; Under ed. A. A. Volchek [et al.]. – Brest, 2016. – Ch. II. – P. 159–163.
2. Degtyarev, D. A. Step-by-step method of multi-factor experiment. [Electronic resource]. – Access mode: <http://manyfactors.ru>. – Access date: 07.01.2019.
3. Mukhachev, V. A. Planning and processing of the results of the experiment: grant/VA. Mukhachev. – Tomsk : Tomsk state university of control systems and radio electronics, 2007. – 118 p.
4. Zhitenev, B. N. Planning of a multi-factor experiment on the example of ion-exchange treatment of water from nitrate / B. N. Zhitenev, S. V. Andreyuk // Journal of BSTU. – 2019. – № 2: Water construction and heat power engineering. – P. 38–43.
5. Triangular coordinate method (Ferré graph). [Electronic resource]. – Access mode : <http://lektsii.com/1-88954.html>. – Access date : 19.01.2015.
6. Begeza, A. A. Studies of the influence of anionic composition of water on the effect of nitrate removal / A. A. Begeza // Collection of competitive scientific works of students and masters: in 2 parts/Ministry of Education of the Republic of Belarus, Brest State Technical University; editorial board : N. N. Shalobyta [etc.]. – Brest : BSTU, 2019. – Part 1. – P. 4–6.
7. Drinking water. Methods of determination of mineral nitrogen-containing substances : GOST 4192-82. May 2011. – Instead of GOST 4192-48; entered RB 17.12.92. – Minsk : Belarus. State. Standardization and certification, 2011. – 5 p.
8. Drinking water. Methods of determination of chloride content: GOST 4245-72. September 2011. – Instead of GOST 4245-48; entered RB 17.12.92. – Minsk : Belarus. State. Standardization and certification, 2011. – 5 p.
9. Drinking water. Methods of determining the content of sulphates: GOST 4389-72. – Re-ID. May 2011. – Instead of GOST 4389-48; entered RB 17.12.92. – Minsk : Belarus. State. Standardization and certification, 2011. – 6 p.
10. Water. Methods of determining alkalinity and mass concentration of carbonates and hydrogencarbonates : GOST 31957-2012; entered RB 01.01.2016. – Minsk : Belarusian. State. Standardization and certification, 2011. – 32 p.

Материал поступил в редакцию 12.03.2020